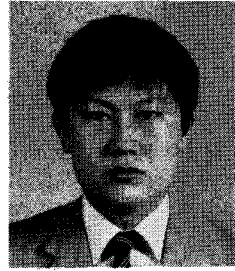


광학개론

(2)



정 해 빈
삼양광학공업(주) 부설연구소부소장

3. 빛의 굴절과 반사

3.1 빛의 속도

옛날의 천문학자들은 빛이 무한대의 속도로 진행하므로 우주의 어느 한 별에서 일어난 일은 우주내의 어디에나 동시에 전달된다고 믿었다. 1600년경 갈릴레오는 빛의 속도를 재보려는 생각을 가지고 실험을 하였다. 갈릴레오와 그의 조수는 각기 덮개가 있는 등불을 가지고 멀리 떨어져 있는 서로 다른 두 산에 올라가 먼저 갈릴레오가 등불의 덮개를 열어 빛으로 그의 조수에게 신호를 보내면, 이 빛을 본 직후 조수가 다시 덮개를 열어 신호를 되돌려 보냄으로써 빛이 두 산 사이를 왕복하는 데 걸리는 시간을 재려 하였다. 그러나, 수없는 반복에도 불구하고 이 실험으로는 빛의 속도를 잴 수 없으므로 빛은 무한대의 속도로 진행된다고 결론지었다. 이와 같이 잘못된 결론을 내릴 수 밖에 없었던 것은 당시로서는 두 산 사이를 왕복하는 데 걸리는 짧은 시간을 측정할 수 없었기 때문이다.

1849년에 프랑스의 피조(Fizeau)는 세계 최초로 빛의 속도를 측정하는 데 성공했다. 그가 사용한 방법은 톱니바퀴의 회전에 의해서 빛이 차단되거나 통과되도록 한 방법으로 그 개략도는 그림3-1과 같으리라고 믿어지고 있다.

광원S에서 나온 강한 광속(beam)은 반거울

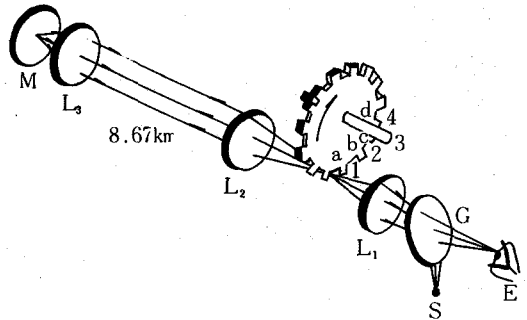


그림 3-1. 피조의 광속측정장치 개략도

(half mirror)G에서 반사된 후 렌즈L₁에 의해서 점O에 상이 맺게 된다. O로부터 확산되는 빛은 렌즈L₂에 의해서 평행광속(parallel beam)으로 바뀌게 되며, 8.67km(이 실험시의 렌즈L₂와 L₃간의 거리임) 떨어져 있는 렌즈L₃까지 가서 렌즈L₃에 의해 집중되어 반사경M에서 반사된 후 되돌아와 반거울G에서 투과하여 사람의 눈E로 들어오게 된다.

이때, 톱니바퀴의 톱니들은 빛을 펄스(pulse)로서 잘라주는 역할을 하게 되는데, 톱니바퀴가 멈춰 있을 때는 빛이 O에 놓인 구멍을 통해 지나가게 된다. 이 상태에서 모든 렌즈와 멀리 떨어진 곳에 놓여 있는 반사경을 정렬(alignment)시켜주게 된다.

이렇게 해서 광학계의 정렬이 끝나면 톱니바퀴를 돌려주되 서서히 그 속도를 높여 나간다.

이와 같이 속도를 높여 나가다보면 어떤 순간에 반사되어 되돌아 온 빛이 톱니a에 의해서 차단된다. 이때는 동일한 속도로 구멍1을 지난 빛은 다음 톱니b에 의해서 차단되게 되므로 관찰자에게는 광원S가 전혀 보이지 않게 된다. 다시 속도가 증가하여 이 속도의 2배가 되면, 다시 광원S가 최대의 강도로 보이게 된다.

피조가 사용한 톱니바퀴는 720개의 톱니를 갖고 있었고, 초당 25회전을 할 때 최대 강도를 얻었으므로 이로부터 빛이 한 번 왕복하는데 걸린 시간을 계산해보면,

$$\left(\frac{1}{720}\right) \times \left(\frac{1}{25}\right) = \frac{1}{18,000} \text{ (초)} \quad (3-1)$$

이 된다. 이때 왕복한 거리는 $8.67\text{km} \times 2 = 17.34\text{km}$ 이므로 결국 빛의 속도는

$$v = \frac{d}{t} = \frac{17.34\text{km}}{1/18,000 \text{ 초}} = 312,000\text{km/초} \quad (3-2)$$

이다. 이후에도 많은 사람들에게 의하여 빛의 속도가 측정되었는데, 그 결과는 표3-1에 나타낸 바와 같다.

표 3-1. 역사적으로 측정된 광속

연도	측정자	측정방법	측정결과
1849	Fizeau	Rotating toothed Wheel	313,000 ± 5000 *
1850	Foucault	Rotating mirror	298,000 ± 2000 *
1875	Cornu	Rotating mirror	299,990 ± 200
1880	Michelson	Rotating mirror	299,910 ± 150
1883	Newcomb	Rotating mirror	299,860 ± 30
1928	Mittelstaedt	Kerr cell shutter	299,778 ± 10
1932	Pease and Pearson	Rotating mirror	299,774 ± 2
1940	Hüttel	Kerr cell shutter	299,768 ± 10
1941	Anderson	Kerr cell shutter	299,776 ± 6
1951	Bergstrand	Kerr cell shutter	299,793.1 ± 0.3

현재는 진공 중에서의 빛의 속도가 다음과 같이 정해져 있으며, 이것을 기호로는 c로 나타내고 있다.

$$c = 299,792.5\text{km/초} \quad (3-3)$$

따라서 앞서 말한 피조의 측정값은 상당히 정확한 값을 알 수 있다. 또한, 이 c값은 실용상 다음의 값이 근사값으로 사용되는 경우가 많다.

$$c \approx 300,000\text{km/초} \quad (3-4)$$

3. 2 굴절률

빛의 속도는 그 빛이 지나가게 되는 물질(이것을 매질이라 한다)에 따라서 달라지게 된다. 물질1과 물질2가 있을 때, 물질2에서 빛의 속도에 대한 물질1에서의 빛의 속도의 비를 물질1에 대한 물질2의 상대굴절률이라 정의한다. 수식으로 나타내면

$$n_{12} = \frac{V_1}{V_2} \quad (3-5)$$

이다. 한편, 빛의 속도는 진공 중에서 가장 크므로 어떤 매질에서의 빛의 속도와 진공 중에서의 빛의 속도 사이의 비를 그 매질의 절대굴절률이라 정의하면 편리하다. 수식적으로는

$$n = \frac{c}{v} \quad (3-6)$$

이다. 보통 굴절률이라고 할 때는 이 절대굴절률을 가리킨다. (3-6)식을 이용하여 (3-5)식을 다시 써주면,

$$n_{12} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/v_2}{c/v_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3-7)$$

이 되어 상대굴절률은 그 두 물질의 절대굴절률의 비임을 알 수 있다.

우리 주변에서 흔히 볼 수 있는 몇 가지 물질들의 굴절률을 나타내 보면 표3-2와 같다. 여기에서 공기의 경우는 온도 0°C, 기압 1기압에서 $n = 1.0002926$ 이라는 값을 나타내므로 통상적으로는 1로 보아 무방하다. 실제의 렌즈설계에서도 공기의 굴절률은 1로 설계되고 있다.

또한, 광학적 밀도라는 말을 사용하는 경우가

표 3-2. 몇가지 물질의 굴절률

물질명	굴절률
공기(0°C, 1기압)	1.0002926
이산화탄소(0°C, 1기압)	1.00045
폴리스티렌	1.59
유리	1.5~1.9
용융 석영	1.46
물	1.33
에틸알코올	1.36
암염	1.52

있는데, 이 경우에는 두 물질의 굴절률을 비교하여 상대적으로 높은 굴절률을 갖는 물질에 대해 광학적 밀도가 낮다고 한다.

3.3 반사와 굴절의 법칙

광선이 굴절률이 서로 다른 두 매질의 경계면에 입사하면 광선의 일부는 반사하여 첫번째 매질로 되돌아가고, 일부는 굴절되어 두번째 매질로 진행하게 된다. 이때, 이 두 광선의 방향과 최초의 입사광선의 방향 사이에는 일정한 관계가 성립하게 된다. 그림3-2에 보인 것과 같이 경계면에 수직한 법선(N과 입사각I가 이루는 각도를 입사각, 반사광R과 이루는 각도를 반사각, 투과광(또는 굴절광)T와 이루는 각도를 굴절각이라 한다. 이때 입사각, 반사각, 굴절각 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다. 우선, 반사광과 입사광 사이에는

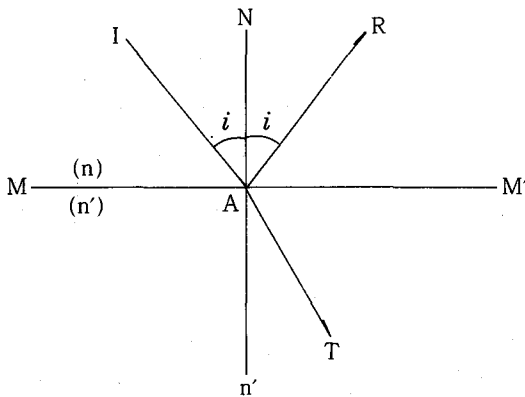


그림 3-2 빛의 반사와 굴절

- ① 입사각과 반사각은 같다.
- ② 반사광은 경계면의 법선과 입사광으로 이루워지는 평면, 즉, 입사면내에 존재하며 법선을 기준으로 하여 입사광의 반대편에 존재하게 된다.

는 관계가 존재한다. 이를 “반사의 법칙”이라 한다.

다음으로 굴절광과 입사광 사이의 관계를 알아보면,

- ① 입사각과 굴절각 사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$n \sin i = n' \sin i'$$

- ② 굴절광은 입사면내에 있게 되고 법선을 기준으로 하여 입사광의 반대편에 놓이게 된다.

는 관계가 성립한다. 이와 같은 내용을 “굴절의 법칙”이라고 한다. 이때 n과 n'은 각각 첫번째 매질과 두번째 매질의 굴절률이며, (3-8)식으로 표시되는 내용을 특히 스넬(Snell)의 법칙이라 한다.

3.4 페르마의 원리

광선이 굴절률 n인 물질속에서 거리d만큼 진행했다고 할 때, 이 둘을 곱해준 값 “n×d”를 광로정(光路程)이라고 정의한다. 즉, 광로정이란 광선이 그 물질내에서 거리d만큼 진행할 수 있는 시간동안에 진공 중에서 진행하였다면 얼마만큼이나 진행할 수 있는가를 나타내는 값이 된다.

어떤 광선이 굴절률이 각각 n_1, n_2, n_3, \dots 인 물질속에서 거리 d_1, d_2, d_3, \dots 만큼 진행하였다면 이때의 광로정은 각각의 광로정의 합으로 주어진다. 즉,

$$[d] = n_1 d_1 + n_2 d_2 + n_3 d_3 + \dots = \sum_i n_i d_i \quad (3-9)$$

이다. 만일 굴절률이 연속적으로 변화하는 매질 속이라면 다음과 같이 적분형으로 나타내진다.

$$[d] = \int_a^b n(x) dx \quad (3-10)$$

이러한 광로정의 개념을 이용하여 빛의 경로에 대해 다음의 원리를 설명할 수 있다.

「광선이 일련의 매질을 지나서 한 점에서 다른 점으로 진행할 때 그 경로는 그 광로정의 1차근사가 001이 되는 경로를 취한다」

이러한 원리를 페르마의 원리(Fermat's Principle)라고 한다. 따라서 광로정은 최대, 최소, 또는 일정한 값이 된다.

3.5 임계각과 전반사

굴절률이 서로 다른 두 물질의 경계면에 광선

이 입사하면 두 물질의 굴절률에 따라서 그림3-3과 같은 현상들이 나타난다. 즉, 그림3-3의 (a)와 같이 굴절률이 낮은 물질에서 높은 물질로 입사할 때는 입사각보다 굴절각이 작아지게 되므로 입사각이 어떠한 각도가 되든지 굴절광선이 반드시 존재하게 된다. 반대로 (b)와 같이 굴절률이 높은 물질에서 낮은 물질로 빛이 입사하는 경우에는 입사각보다 굴절각이 커지게 되며, 입사각을 점점 크게 해주면 (c)에서와 같이 굴절각이 90°가 되는 입사각 i_c 가 존재하게 된다. 이 특별한 각을 임계각(critical angle)이라 하며, 임계각보다 큰 각도로 입사한 빛은 투과광선이 존재하지 않고 반사광선만이 존재하게 된다. 이와 같이 입사광 전부가 반사되는 경우의 반사를 전반사(total reflection)라고 한다.

첫번째 물질의 굴절률이 n , 두번째 물질의 굴절률이 n' 이고, $n > n'$ 일 때의 임계각은 다음과 같이 구할 수 있다. 임계각 i_c 에서 굴절광선의 굴절각이 90°가 되므로 그 사인(sine)값은 1이 된다. 따라서 스넬의 법칙으로부터 다음의 관계식이 성립한다.

$$n \times \sin i_c \times n' \times 1 \quad (3-11)$$

따라서 임계각 i_c 는

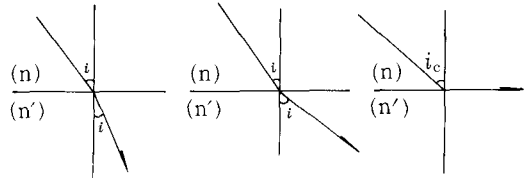
$$i_c = \arcsin\left(\frac{n'}{n}\right) \quad (3-12)$$

으로 주어진다.

통상적인 크라운 유리라 할 수 있는 굴절률 1.520의 유리가 공기 중에 놓인 경우를 생각해 보면 $\sin i_c = 0.6579$ 이고, 따라서 $i_c = 41^\circ 8'$ 이 된다. 몇 가지 종류의 유리가 공기 중에 놓여 있을 때의 임계각을 구해보면 표3-3과 같다. 이와 같은 전반사에는 빛의 흡수가 일어나지 않아 광량의 손실이 없으므로 프리즘을 이용하여 빛의 경로를 바꿔주는데 응용되고 있다. 프리즘 중에서 가장 간단한 형태라 할 수 있는 직각프리즘을 가지고 생각해보면, 그림3-4의 (a)에서 b면과 c면에서의 입사각은 45°로 프리즘이 굴절률 1.520인 유리로 만들어져 있을 경우 입사각이 임계각보다 크게 되어 전반사가 일어나게 된다. 또한, (b)에서는 a면에서의 입사각이

45°로 굴절률 1.520인 유리로 만들어져 있는 경우 역시 전반사를 일으키게 된다.

같은 형태의 직각프리즘이라 하더라도 (a)와 (b)에서는 각각 그 이용방법이 다르므로 (a)의 경우는 a면에 투과도를 높이기 위해 무반사코팅(AR Coating; anti-reflection coating)을 해주게 되고, b와 c면에서는 전반사를 이용하기 위해 코팅을 해주지 않게 된다. (b)의 경우에는 반대로 b와 c면에 무반사 코팅을 해주고 a면에는 코팅을 해주지 않는다. 쌍안경에서 거꾸로 된 상을 바로 잡아주기 위해 사용되는 프리즘은 (a)와 같은 방식으로 이용되고 있으며, 잠망경에 이용되는 프리즘은 (b)와 같은 방법으로 사용되고 있다.



(a) $n < n', i > i'$ (b) $n > n', i < i'$ (c) $n > n', i_c$: 임계각

그림 3-3 전반사와 임계각

표 3-3. 몇가지 광학유리에서의 임계각
(공기중에 놓인 경우)

유리의 종류	굴절률(n_d)	임계각
BK-7	1.517	41° 14'
BaK-4	1.569	39° 36'
BaF-3	1.583	39° 11'
F-1	1.626	37° 57'
LaF-9	1.795	33° 51'
LaSF-9	1.850	32° 43'
SF-59	1.953	30° 48'

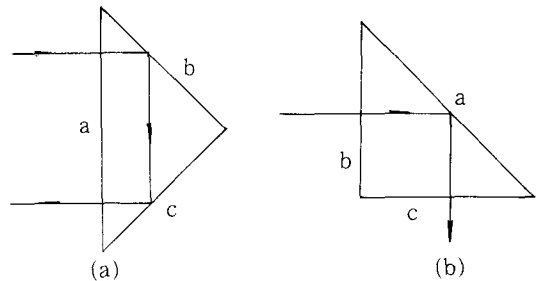


그림 3-4. 직각프리즘에서의 전반사

3.6 색분산

굴절률은 각 물질에 따라서도 달라지지만, 한 매질안에서도 빛의 파장에 따라서 그 값이 달라진다. 그림3-5와 같이 백색광이 두 매질의 경계면에 입사하면 백색광에 포함되어 있는 각 파장마다 굴절률이 다르므로 각각의 파장에 대해 스넬의 법칙이 성립하므로 굴절후에 색이 나뉘어서 나타나게 된다. 이러한 현상을 색분산(color dispersion)이라 하며, 광학계에서 문제가 되는 색수차의 근원이 된다.

일반적으로 광학유리에서 말하는 굴절률은 프라운호퍼(Fraunhofer)의 스펙트럼선 중에서 d-선에 대한 값이며, 광학설계에서는 색분산값으로서 C-선과 F-선에 의한 굴절광의 굴절후의 각도차이로서 나타내고 있다. 그림3-5에서는 이러한 각도차이가 실제보다 과장되어 나타내져 있다.

대표적인 크라운 유리라 할 수 있는 BK-7의 각 선에 대한 굴절률은 다음과 같다.

$$n_F = 1.52237 \quad (3-13)$$

$$n_d = 1.51680 \quad (3-14)$$

$$n_C = 1.51432 \quad (3-15)$$

따라서 F선과 C선에 대한 굴절광 사이의 각도 ($i'_F - i'_C$)은 두 선에 대한 굴절률간의 차

$$n_F - n_C = 0.00805 \quad (3-16)$$

에 비례하게 된다. 또한 d-선에 의한 굴절광선과 입사광선의 편각은 $n_d - 1$ 에 비례하는데, 이 예에서는

$$n_d - 1 = 0.51680 \quad (3-17)$$

이다. 이제 F-선과 C-선의 굴절광간의 각도로 d-선에 의한 굴절광선과 입사광선간의 편각을 나눠주면 64.2가 된다. 이 비율은 유리의 종류에 따라 많은 차이를 나타내는데, 광학물질에 있어서 주요한 특성치의 하나이다.

유리가 색을 얼마나 잘 분산시킬 수 있는가하는 능력을 분산능(dispersive power)이라고 하는데, 이 값을 수식적으로 다음과 같이 정의된다.

$$V = \frac{n_F - n_C}{n_d - 1} \quad (3-18)$$

또한, 분산능의 역수를 분산계수(dispersive in-

dex), 또는 아베수(Abbe's number)라 하며 다음과 같이 수식적으로 정의된다.

$$V = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (3-19)$$

대부분의 광학유리는 20~60 정도의 아베수를 갖고 있다. 한편, 쌍안경과 같이 육안으로 직접 보게 되어 있는 광학계는 그 중심파장으로서 d-선 대신에 사람눈에 대해서 비교적 감도가 높은 e-선을 사용하고 있다. 이때의 아베수는 첨자 e 를 사용하여

$$V_e = \frac{n_e - 1}{n_F - n_C} \quad (3-20)$$

로 나타내고 있다.

이러한 색분산현상은 정삼각형 모양의 프리즘을 써서 태양광을 분리해냄으로써 확인할 수 있다. 이때, 파장이 짧은 보라색쪽으로 갈수록 많이 굴절되게 되며, 파장이 긴 붉은색쪽으로 갈수록 적게 굴절되어 그림3-6에서와 같이 빛이 나뉘지게 된다. 이때 나타나는 색은 무지개와 같다.

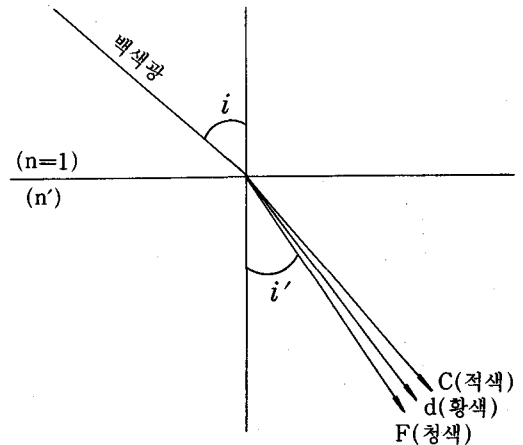


그림 3-5. 색분산

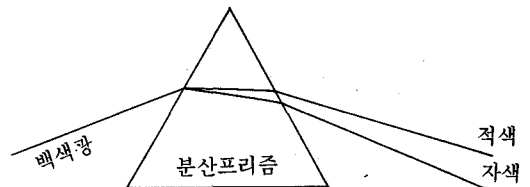


그림 3-6. 분산프리즘에 의한 백색광의 분산